

LTE におけるハンドオーバー時の バーストロスに伴う TCP 通信遅延の抑制方式

西川由明^{†1} 城島貴弘^{†1}

本稿では、LTE 端末がハンドオーバー直前に送信したパケットが数秒間バースト的にロスすると、指数バックオフにより TCP の再送間隔が長大化しハンドオーバー後の片道遅延時間が数十秒となる現象に対して、サーバでの受信間隔とハンドオーバーの情報を用いてパケット送信するコネクションを切り替えることでアプリケーションレベルの通信遅延を低減する方式を提案する。LTE では十分な電波強度が確保されているにもかかわらず、ハンドオーバー時に通信が停止しているようにユーザが体感することがある。混雑時間帯のハンドオーバー直前数秒間に送信されたパケットはバースト的にロスする場合があります、その間に TCP が何度も再送を繰り返すことによりバックオフ時間が長大化し、ハンドオーバー後も未経過のバックオフ時間待機することが一因である。従来から、TCP の再送制御や順序制御に起因する遅延増大の回避策として、パケット送信ごとに複数のコネクションを切り替える方法が提案されている。今回、サーバでの受信間隔と LTE 端末でハンドオーバーの情報を用いて、二つのコネクションを切り替えて通信する方式を考案した。この方式を商用の LTE 網で実機検証し、ハンドオーバー後の片道通信遅延時間を最大で 95%低減できた。

Method for decreasing delay time after burst packet loss on a LTE handover

YOSHIAKI NISHIKAWA^{†1} TAKAHIRO SHIROSHIMA^{†1}

In this paper, we propose a method for decreasing delay time for an application by switching connections to send packets on a TCP connection. People using Mobile network often see that communication through the mobile network is stopping, though the radio intensity is enough strong for the communication. It is known that the end-to-end delay time of TCP can become long when a packet loss occurs on the communication path. Methods using multiple TCP connections with the purpose of avoiding that long delay time have been proposed. In this paper, we propose the method to switching two TCP connections. The appropriate time to switch connections is calculated based on receiving intervals at the receiver and time when a handover occurred. The experimental result shows that our methods reduced the delay by 95% in the commercial LTE network.

1. はじめに

モバイル網ではパケ詰まりと呼ばれる現象が発生し、利便性に大きな影響を与えている。パケ詰まりとは十分な電波強度が確保されているにもかかわらず通信ができない状態であると考えられている。パケ詰まり状態に陥るとアプリケーションが通信できない状態になり、利便性が大きく低下する。都市部の混雑した場所や電車での移動時に Web ページの表示時間が長くなるなどの現象はパケ詰まりが原因だと認識されている[1][2]。

Web ページの情報を取得するなど様々なアプリケーション

ンで利用される TCP では、遅延時間の長い通信路上でロスが発生すると順序制御の影響により遅延時間が長大化する Head of line (HOL) ブロッキング問題が知られている[3][4]。TCP は高信頼な通信を提供するプロトコルであり、再送制御と順序制御により信頼性を実現している。再送制御には二つの制御がある。一つは、パケットがロスしてしまうなどが原因で受信側に正しく届いたことを証明する確認応答パケットを送信側が受信できない場合に、再送タイマーとして設定されている一定期間待って、パケットを自動的に再送する制御である。もう一つは、ロスしたパケットの後に送信したパケットが受信側に到着したときに返送される重複確認応答パケットを数個受信すると、即座に再送を行う制御である。順序制御とは、各パケットにシーケンス番号を付加し、パケットを受信した順番にアプリケーションなどの上層に渡すのではなく、シーケンス番号が順序通り

^{†1} NEC クラウドシステム研究所
NEC, Cloud System Research Laboratories
1753 Shimonumabe Nakahara-ku Kawasaki,
Kanagawa 211-8666, Japan

になるようにパケットを入れ替えて上層に渡す制御である。受信側では受信したパケットのシーケンス番号を監視しており、次に受け取るべきシーケンス番号より大きいシーケンス番号のパケットを受け取った場合には、そのパケットを TCP 層内でバッファリングする。バッファリングされたパケットはそのシーケンス番号より小さいシーケンス番号のパケットがすべて受信されるまでバッファ内で待機させられる。これらの二つ制御により、TCP コネクション上で送信されるパケットがロスすると、後続のパケットはロスせずに受信されたとしてもロスしたパケットが再送され受信されるまで TCP 層でバッファリングされてしまいアプリケーションまで到達しない。さらに、パケットが長い期間継続的にロスするような環境では、重複確認応答が到着せず、再送タイマー経過で送信する再送パケットもロスしてしまうので、TCP を用いたアプリケーションレベルの遅延時間は長大化してしまう。したがって、混雑時などロスが発生しやすい通信環境ではアプリケーションレベルでの遅延時間が大きく増加しやすいといえる。

本稿ではまず、ラッシュ時の混雑した駅周辺での体感品質が特に悪いという体験から電車での移動時に注目した LTE 網における通信状態の調査実験について報告する。電車での移動中に LTE 端末とインターネット上のサーバ間で定期的にパケットを送受信し、パケットロスと遅延時間を調査する。同時にハンドオーバー時にパケットロスが発生するという仮定のもとハンドオーバーイベントの検出を行う。次に、調査結果を踏まえて考案したサーバでの受信間隔と LTE 端末でのハンドオーバーイベントの情報を用いてコネクションを切り替える遅延低減方式とその効果について報告する。提案方式を用いることで、TCP 通信を行うアプリケーションレベルの遅延時間を 14 秒から 0.7 秒へと 95% 低減できた。

2. 関連研究

TCP でパケットロスが発生すると HOL ブロッキングが発生しリアルタイムな通信が阻害される。ここでリアルタイムな通信とは、一定間隔でパケットが送信され、一定間隔で受信されることが望まれるような通信である。HOL ブロッキングにより一時的に大きな遅延が発生すると、受信間隔が一時的に長大化し、リアルタイム通信が阻害される。そのため、複数のコネクションを用意し、パケットロスが発生する期間に同一のコネクションを利用しないように通信を行えば、HOL ブロッキングの発生を回避し、パケットロスに起因する受信間隔の拡大を最小化できる。文献[5]では、パケット送信ごとに異なるコネクションを用いることで、リアルタイムな通信を可能とする方法が提案されている。パケットがロスする期間に合わせて多数のコネクションをあらかじめ確立しておく必要があり、アクセスが集

中するサーバ側のオーバーヘッドの増大が問題となる。

文献[6]では、再送制御を行わずロスしたシーケンス番号を用いて最新のパケットを送信する再送制御型 TCP の提案を行っている。TCP ではロスの発生をシーケンス番号の連続性で判断する。すなわち、受信側においてシーケンス番号が連続でない場合にロスが発生したと認識する。そのため、ロスしたパケットと同じシーケンス番号で最新のパケットを送信することで、受信側 TCP の改造なしに最新のパケットをリアルタイムに届けることができる。これにより、10 秒以上の長いロス期間が存在するネットワーク環境で UDP に近いリアルタイム性があることを確認している。

本稿では、ロスの発生が数秒間継続するようなネットワーク環境において、サーバでの受信間隔とハンドオーバーのイベント情報を用いてアプリケーションレベルでロスする期間の発生と終了を検出し、ロスが発生する期間の終了と共に予め確立しておいた予備のコネクションに切り替えて送信することで最新のパケットが HOL ブロッキングの影響で遅延することを回避する方法を提案し、商用 LTE 網での実験結果を示す。提案方式は、複数のコネクションを利用するが、ロスする期間の終了を検出することで、予備のコネクション数を一つにできる。そのため、アクセスが集中するサーバ側のオーバーヘッドの増加を抑制しつつリアルタイムな通信が可能となる。

3. 調査実験

本章では調査実験について報告する。調査の主たる目的は、電車での移動時に上り通信を行う場合の遅延時間が長大化することとハンドオーバー、パケットロスの関係を確認することである。ただし、4 章で説明する提案方式において LTE 端末とサーバが協調する制御を行った場合の遅延時間を知る目的で、下り方向の遅延時間も計測する。

3.1 調査環境と方法

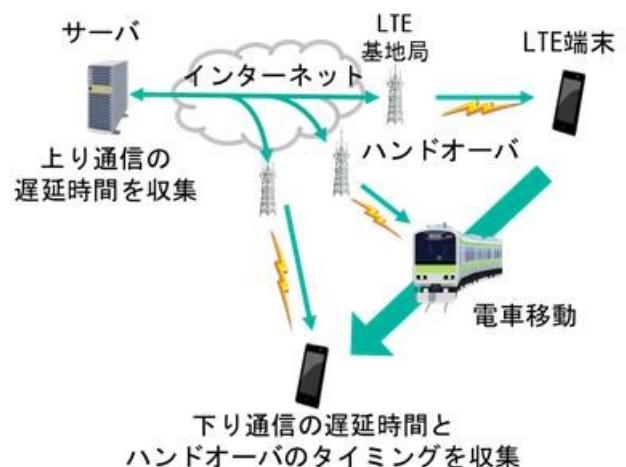


図 1 調査実験の構成

図 1 にネットワーク環境について説明する。商用の固定網を介してインターネットに接続している Linux サーバと商用の LTE 網に接続した Android OS の LTE 端末がある。サーバと LTE 端末は TCP コネクションを確立し、TCP と UDP を用いて定期的に双方向に通信を行う。また LTE 端末は実験中電車で移動している。

次に実験方法について説明する。LTE 端末からサーバへの上り方向では 100ms ごとにデータ交換のための通信を想定した 1000Byte のパケットを TCP と UDP でそれぞれ非同期に送信し続ける。サーバから LTE 端末への下り方向では、100ms ごとに制御情報の通信を想定した 50Byte のパケットを UDP で送信を続ける。TCP での通信により実際にどの程度の遅延時間になるかが明らかになり、UDP での通信によりパケットロスの発生とパケットレベルでの遅延時間が明らかになる。さらに、LTE 端末では接続している基地局の ID を監視し続けており、ID が変化した時刻をハンドオーバー完了の時刻とする。基地局の ID 監視には Android OS の標準 API を利用しており、ID が変化するとイベントドリブンで通知される。サーバと LTE 端末ではパケットキャプチャを行いパケットレベルでロスしたかどうかを確認できるようにしている。帰宅で混雑する環境として JR 山手線と JR 南武線における平日の 17 時から 19 時に調査を行った。

本稿で用いる遅延時間は片道遅延時間を意味する。実験前に RTT が 5 ミリ秒程度のローカルネットワーク内でサーバと WLAN 接続の LTE 端末の時刻同期を行うことで正確な片道遅延時間の計測を可能としている。

3.2 調査結果

図 2 に JR 南武線で混雑時間帯に取得した上り方向の TCP と UDP パケットの遅延時間と送信時刻、ハンドオーバー完了イベントの発生時刻を示す。横軸は、遅延時間についてはパケットの送信時刻でありハンドオーバー完了イベントについてはイベント発生時刻である。縦軸は遅延時間を表すが、ハンドオーバー完了イベントは見やすい高さにプロットしているため高さに意味はない。図より送信時刻 29 秒から 31 秒の約 2 秒間に送信した上り方向の UDP パケットがロスしてサーバに到着していないことがわかる。また、UDP パケットがロスしている期間に送信した TCP パケットの遅延時間が 60 秒程度に達し、ロス期間終了後の UDP パケットの遅延時間は 20 秒程度である。パケットキャプチャより UDP のロス期間中に TCP パケットもロスしていることを確認できており、TCP では HOL ブロッキングが発生し遅延時間が長大化しているが、HOL ブロッキングを回避できれば UDP と同等の遅延時間にできることがわかる。

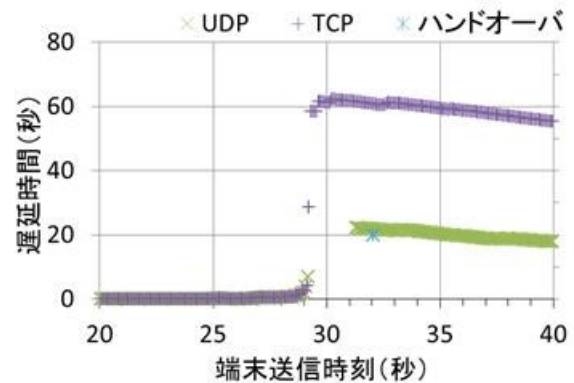


図 2 上り方向の UDP と TCP の遅延時間

次に、ロス期間終了直後の TCP と UDP におけるパケットレベルでの遅延時間について図 3 に示す。縦軸は上り方向の TCP と UDP の遅延時間であり、横軸は各パケットの送信時間である。時刻 29 秒を過ぎたあたりから時刻 31 秒を過ぎたあたりまでの約 2 秒間のロス期間が存在している。この間に送信された TCP と UDP のパケットはロスしている。ロス期間直前の TCP の遅延時間は 4 秒で UDP の遅延時間は 6 秒であり、同等の遅延時間となっている。さらにロス期間終了直後の TCP の遅延時間は 23 秒で UDP の遅延時間は 23 秒であり、等しい遅延時間となっている。このことから、パケットレベルでの遅延時間は TCP と UDP で等しく、今回利用する LTE 網においては、ロス期間終了直後にコネクションを切り替えて送信することで UDP と同等の遅延時間まで TCP の遅延時間を低減できることがわかる。ロス期間終了直後の UDP の遅延時間が大きく上昇している原因は明らかとなっていないが、混雑した基地局に接続してしまったので、遅延が増加しているものと考えられる。

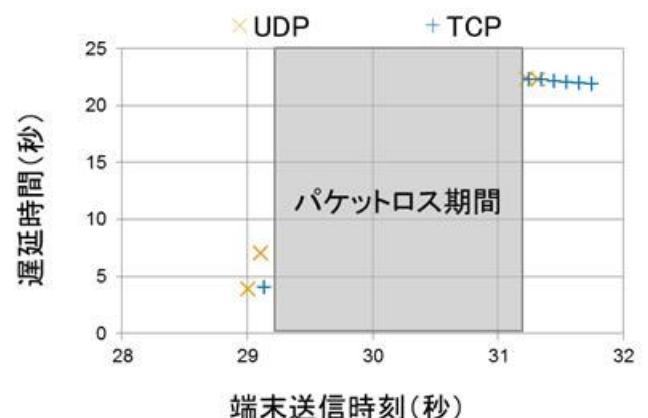


図 3 TCP と UDP のパケットレベルの遅延時間

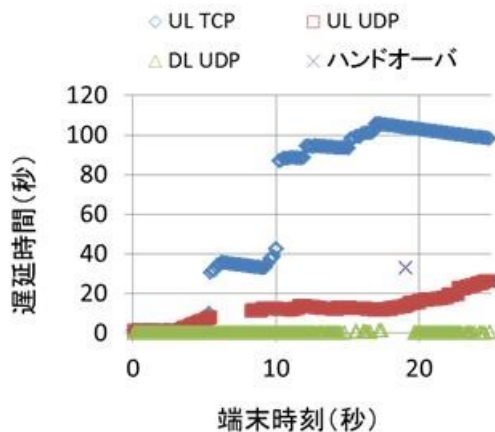


図 4 上り方向 TCP と UDP、下り方向 UDP の遅延時間と端末での送受信時刻、およびハンドオーバー完了時刻

次に図 4 に JR 山手線の混雑時間帯での上り方向 TCP と UDP の遅延時間とハンドオーバー完了のイベント、下り方向 UDP の遅延時間を示す。追加した下り方向 UDP の遅延時間について横軸は受信時刻である。時刻 5 秒から 8 秒の 3 秒間に送信した上り方向の UDP パケットがロスしており、その間に送信した上り方向の TCP の遅延時間が 35 秒から 40 秒になっている。その後、時刻 20 秒直前にハンドオーバーが完了し、その直後から下り方向の UDP が低遅延時間で通信できている。この例においても上り方向の UDP がロスしている期間に送信した上り方向の TCP の遅延時間が長大化する現象が発生している。

ロスする期間に注目すると、上り方向と下り方向でロスする期間がずれているように見える。時刻 8 秒頃に送信した上り方向 UDP の遅延時間が 11 秒なので、時刻 19 秒頃に発生したハンドオーバー直後にサーバに届いている。つまり、上り方向の UDP も下り方向の UDP もハンドオーバー完了の直後から受信が再開されている。ロスする期間の終了については上り方向と下り方向でずれていない。ハンドオーバーにより新たな基地局に接続することで通信が回復しロス期間が終了するのだと考えられる。

次に、図 4 と同じ時刻の遅延時間とハンドオーバー完了イベントについて、サーバ視点でのグラフを図 5 に示す。サーバ視点のグラフでは、横軸は上り方向の遅延時間についてはパケットの受信時刻であり、下り方向の遅延時間については送信時刻であり、ハンドオーバー完了イベントについてはイベント発生時刻である。上り方向 TCP の受信間隔が時刻 16 秒から時刻 19 秒のハンドオーバー完了後も伸び続けていることがわかる。上り方向 TCP の受信間隔は少なくともロス期間分長くなり、HOL ブロッキング問題によりロス期間終了後もしばらく受信間隔は伸び続ける。したがって、サーバが最後に受信したパケットの送信時刻を LTE 端末に返すことで、LTE 端末はロス期間の開始時刻を知ることができる可能性が高い。

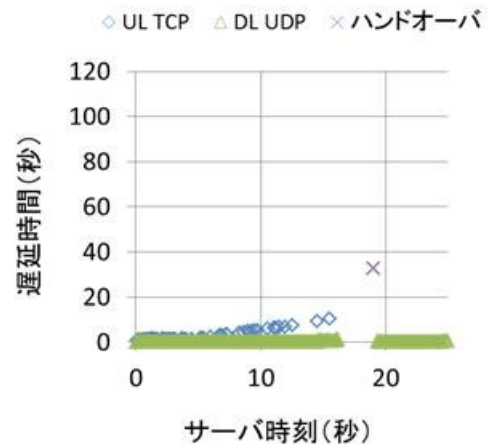


図 5 上り方向 TCP、下り方向 UDP の遅延時間とサーバでの送受信時刻、およびハンドオーバー完了時刻

3.3 調査結果のまとめ

調査実験として、インターネット上のサーバと商用の LTE 網に接続した LTE 端末間での定期的な遅延時間と基地局の ID の監視を行った。JR 南武線での調査結果では、ロス期間終了直後の上り方向の TCP と UDP のアプリケーションレベルでの遅延時間を比較すると TCP の方が 3 倍程度長くなっていた。また同様に、パケットレベルでの遅延時間を比較すると TCP と UDP で大きな違いはなかった。このことから TCP コネクションを適切なタイミングで切り替えると理想的には UDP と同等の遅延時間で通信可能であることが確認できた。次に JR 山手線での調査結果では、上り方向と下り方向でロス期間がずれているが、ロス期間終了直後に送信したパケットの到着時刻は、ハンドオーバー完了イベント発生直後であった。このことから、ハンドオーバー完了後に下り方向通信のパケットを受信した時には通信が回復していることが確認できた。さらに、同時刻のサーバでの上り方向 TCP の受信間隔を見ると、ロス期間開始直前に受信した後の受信間隔が広がっていた。このことからロス期間が存在すると、少なくともロス期間以上に受信間隔が広がることを確認できた。

ロス期間について判明した内容は以下にまとめる。

- パケットロスが発生する期間は 3 秒程度である
- ハンドオーバー完了後にロス期間が終了する
- ロス期間が終了すると下り方向通信のパケットが到着する
- ロス期間が発生するとサーバ側で受信間隔が伸びる

4. 提案方式

次に、調査実験で得られた情報を用いてアプリケーションレベルの制御でロス期間の発生と終了を検出しコネクションを切り替えることで上り方向の TCP の遅延時間を低減する提案方式について図 6 に示す。まず、LTE 端末はサ

サーバへ定期的にパケットを TCP と UDP で非同期に送信し、同時に基地局の ID を監視してハンドオーバーの完了を検出する。LTE 端末からのパケットには送信時刻を含める。サーバでは TCP パケットの受信間隔を監視し、受信間隔が閾値 $T_{recvinterval}$ を超過すると、LTE 端末に向けて UDP を用いてロス期間が開始したことを示すロス期間開始通知を送信する。このロス期間開始通知には、サーバが最後に受信したパケットの送信時刻 $T_{lastsent}$ を含める。またこのロス期間開始通知は、それ自体がロスする可能性を考慮し、LTE 端末との予備の接続で新たなパケットを受信するまで定期的に送信する。LTE 端末では、ハンドオーバー完了を検出した時刻 $T_{handover}$ とサーバから送信されたロス期間開始通知の受信時刻 $T_{lossstart}$ が $0 < T_{lossstart} - T_{handover} < T_{switch}$ の関係となり、かつ、 $T_{lastsent} < T_{handover}$ となる場合に、ロス期間が終了したものと、パケット送信を予備の接続に切り替える。 T_{switch} はロス期間とハンドオーバーに関係があるかを同時性から判断する閾値であり、適切に設定する必要がある。この値が小さすぎると、接続の切り替えが発生せず、この値が大きすぎると、不必要な切り替えが多発してしまう。予備の接続に切り替えた時点で実際にロス期間が終了していれば、接続切り替え後のパケットはロスすることなくサーバに到着する。切り替え直後にはロスして再送待ちのパケットが存在しないため、順序制御による TCP 層でのバッファリング時間が存在せず、低遅延にアプリケーションまで到達できる。

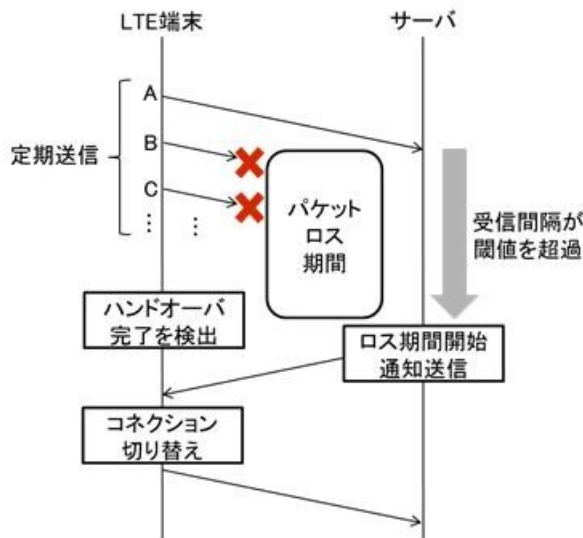


図 6 提案方式の概要

5. 効果検証実験

前章で提案した方式の効果を検証するための実験について報告する。実験は商用の LTE 網に接続した実機を用いて行った。

5.1 実験環境と方法

効果検証実験に用いたネットワークと装置は調査実験と同様である。本実験では、 $T_{recvinterval}$ を 3 秒、 T_{switch} を 10 秒とした。LTE 端末からサーバへの定期送信間隔は 100ms とした。混雑する環境として JR 山手線において平日の 17 時から 19 時に実験を行った。

まず、実験の準備として LTE 端末とサーバの間で接続切り替え前に使用する TCP 接続 #1 と接続切り替え後に使用する予備の TCP 接続 #2 を確立する。乗車後に、LTE 端末からサーバへ TCP 接続 #1 を用いてパケット送信を開始する。上り方向のデータ転送を想定し 1000byte のパケットを 100ms 間隔で送信した。調査実験同様に、LTE 端末からサーバへ UDP を用いたパケット送信も行った。また、送信する各パケットには送信時刻を含めている。TCP 接続 #1 と TCP 接続 #2 で送信したパケットのアプリケーションレベルでの遅延時間の違いから提案方式の遅延低減効果を測り、UDP と TCP 接続 #2 を比較することでどれだけ早期に通信回復できているかを測る。

5.2 実験結果

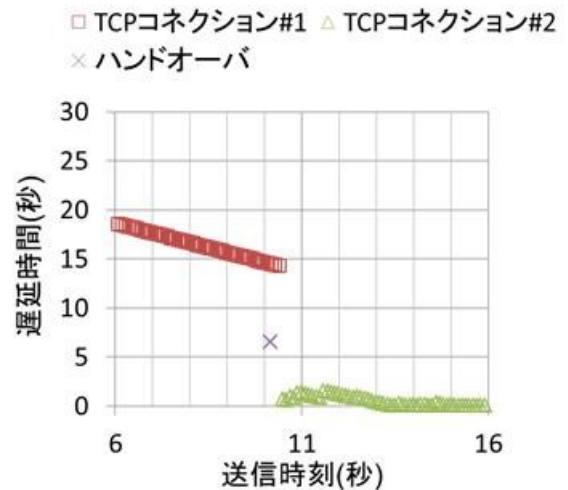


図 7 接続切り替えによる遅延時間の変化

図 7 に接続を切り替えた時の遅延時間の変化を示す。横軸は、上り方向の TCP 接続 #1 と TCP 接続 #2 でのパケット送信時刻であり、ハンドオーバー完了イベントについてはイベント発生時刻である。縦軸は遅延時間を表す。時刻 10.5 秒付近で接続 #1 から接続 #2 への切り替えが発生している。切り替え直前に TCP 接続 #1 で送信したパケットの遅延時間は 14 秒であり、切り替え直後に TCP 接続 #2 で送信したパケットの遅延時間は 0.7 秒であった。

通信再開の早さについて理想的な接続切り替えを行った場合と提案方式を用いた場合、用いなかった場合を比較するために、同時間帯の上り方向 UDP の遅延時間を

追加したグラフを図 8 に示す。また、破線は送信する提案方式を用いずに TCP コネクション#1 で送信し続けた場合の予想遅延時間である。上り方向の UDP では時刻 9.5 秒以前に送信したパケットがロスしており、それ以降に送信したパケットは受信に成功している。コネクション切り替え後の TCP コネクション#2 では UDP に遅れること約 1 秒で通信が回復しており、提案方式によるロス期間の終了検出が正確であることがわかる。提案方式を用いない場合には遅延時間が長大化しており、新しいパケットの到着は提案方式を用いる場合と比較し 13 秒遅延する。コネクション切り替え後の TCP コネクション#2 では UDP と同等の遅延時間で通信ができており、提案方式を用いるだけで UDP のリアルタイム性と TCP の信頼性の両立ができています。

ここまで実験における効果について報告してきたが、低減効果はロス期間の長さやパケットロス前後の遅延時間などネットワーク環境によって変化する。更なる実験を行い、統計的に効果を検証する必要があると考える。また、今回上り方向の通信に注目して方式を提案したが、トラフィック数が多い下り方向にも適用可能な方式の検討も必要である。

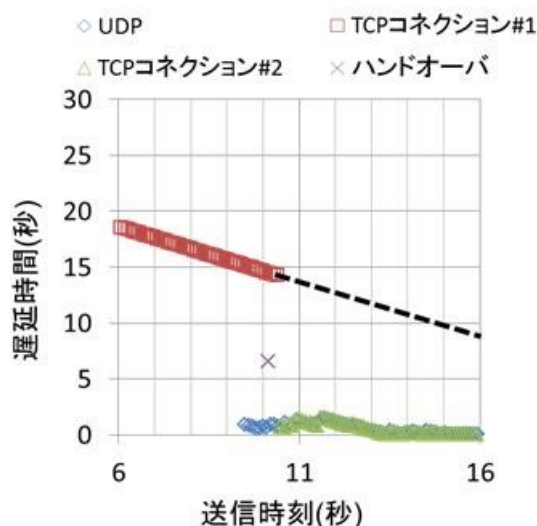


図 8 上り方向 UDP とコネクション切り替え後の TCP の通信再開タイミング

6. おわりに

本稿では、商用の LTE 網と商用の LTE 網に接続している LTE 端末を用いて調査を行い、その結果得られた情報に基づいてアプリケーションレベルでの遅延時間を低減する方式を提案し、実機評価で効果を確認した。LTE 網では継続的にパケットがロスしてしまう期間があり、その間に TCP で通信を行うとパケットがロスし HOL ブロッキングが発生するので遅延が増大してしまう。また、TCP でパケットを送信した場合の遅延時間と UDP での遅延時間を比較すると、適切なタイミングで TCP コネクションを切り替える

ことで、TCP でパケットを送信しても遅延時間を低減できることを確認できた。さらに、サーバでの受信間隔の拡がりやハンドオーバー完了イベントの発生、下り方向通信のパケット到着の情報を用いて、LTE 網で発生する継続的にパケットロスしてしまう期間の終了を検出することができることが明らかになった。パケットがロスする期間の終了を検出した時点で、予め確立しておいた TCP コネクションに切り替える提案方式を提案した。商用 LTE 網と LTE 網に接続する実機を用いた評価実験で、提案方式を用いてコネクションを切り替えることで遅延時間を 95%低減できた。提案方式は、定期的にパケット送信を行う、送信パケットに送信時刻を含める、下り方向の UDP パケットが許可されているなど前提条件が多く適用領域が制限されてしまう。今後は条件を緩和した場合の方式を検討し適用領域を広げたい。

参考文献

- [1] 株式会社ブランド総合研究所. "iPhone5s・5c 購入意向意識調査及び iPhone5s パケ詰まり調査."
http://tiiki.jp/news/wp-content/uploads/2013/09/iPhonesurvey_news_release201309303.pdf
- [2] MMD 研究所. "LTE 対応スマートフォン所有者の 55.5%が「つながりやすさ」を実感."
https://mmdlabo.jp/investigation/detail_1250.html
- [3] Scharf, Michael, and Sebastian Kiesel. "NXG03-5: Head-of-line blocking in TCP and SCTP: analysis and measurements." Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM'06. IEEE, 2006.
- [4] Brosh, Eli, et al. "The delay-friendliness of TCP for real-time traffic." *Networking, IEEE/ACM Transactions on* 18.5 (2010): 1478-1491.
- [5] 馬場昌之, 西川博文, and 加藤嘉明. "複数 TCP コネクションを利用したリアルタイム伝送方法." *電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学* 107.380 (2007): 71-76.
- [6] 横山周太, 山本寛, and 山崎克之. "携帯網の通信特性評価及び再送制御型 TCP の実装と評価." *電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム* 95.5 (2012): 1133-1141.